

論文 高靱性セメント複合材料で上面増厚した鋼床版の水中環境下の輪荷重走行試験

三田村 浩^{*1}・福田 一郎^{*2}・加藤 静雄^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨 : FRP 製のプレート型ジベルをずれ止めに用いて, 高靱性セメント複合材料 (ECC) を上面増厚した鋼床版について, 水の存在が疲労特性におよぼす影響を検討するため, 水の影響を段階的に変化させた環境での輪荷重走行試験を実施した。その結果, 表面および下面に流水がある状態では, 乾燥状態の試験と比較して疲労耐久性の低下は生じないが, 鋼床版上面から ECC 上面までを完全に水浸させて, 荷重の作用範囲近傍を密閉させた状態では, 比較的早期に損傷を生じることが確認された。

キーワード : 輪荷重走行試験, 高靱性セメント複合材料, 疲労, 合成床版

1. はじめに

近年, 既設鋼床版の疲労損傷事例が増加しており¹⁾, 対策の1つとして, 鋼床版の上面にコンクリート等を増厚し, 一体化させて合成床版構造とすることが考えられる。著者らは, その増厚材料として, 優れた引張性能を有する高靱性セメント複合材料 (Engineered Cementitious Composite ; ECC) を適用する上面増厚補強工法を考案した (以下, 本工法)²⁾。図-1 に本工法の概要図を示す。ずれ止めには, FRP 製のプレート型ジベル (以下, PL ジベル) を使用し, PL ジベルと鋼床版間は接着接合する。鋼床版の上面は, 防水層により被覆する。ECC は, 繊維の架橋効果により引張力を負担でき, 一軸引張応力下においても擬似ひずみ硬化特性を示す³⁾。輪荷重により鋼床版に発生する局所的な引張力や, ECC の乾燥収縮および鋼床版と ECC との温度差により発生する温度応力に対して, ひび割れ発生後も繊維の架橋効果により引張応力を伝達してひび割れを拘束するため⁴⁾, ひび割れ幅抑制効果と合成鋼床版としての補強効果が期待できる。そのため, 鋼床版のひずみ (応力) を低減し,

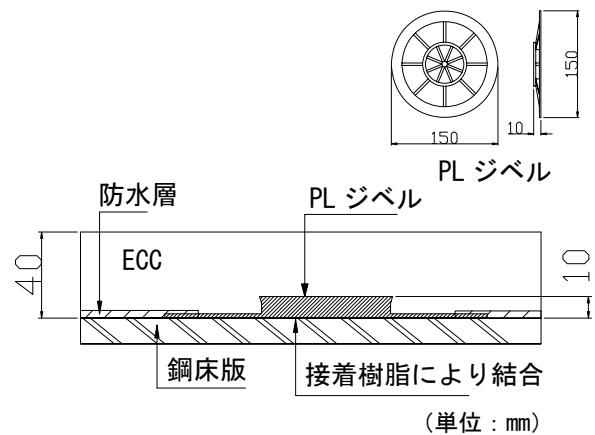


図-1 本工法の概要図

疲労耐久性の向上が期待できる。

著者らは, これまでに様々な検討を実施し, 一般的な環境下における本工法の疲労耐久性を確認している^{2,5)}。一方, RC 床版の疲労耐久性は, 水の影響により大きく低下することが知られており⁶⁾, 本工法においても, 水による影響を明らかにしておく必要がある。

そこで, 実物大の試験体を用いて, 水の影響を段階的に変化させた輪荷重走行試験を行い, 本工法の疲労耐久性におよぼす水の影響について検討した。

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ主任研究員 (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 技術研究所土木構造・材料グループ (正会員)

*3 (株) ドーコン 構造部副技師長

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

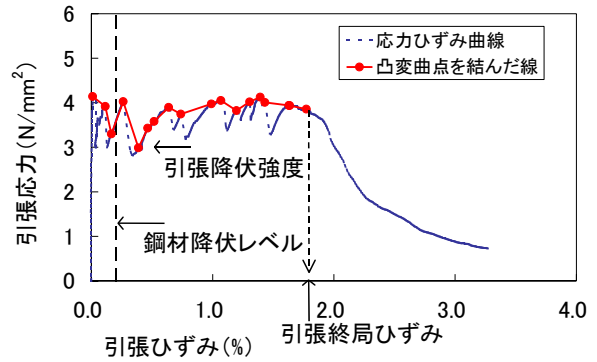
片として鋼板の余長部分から採取した。防水層には吹付け硬化型のポリウレタ樹脂を用いており、ECC と防水層間の付着力は $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ 以下と小さい。PL ジベルと鋼床版の接合には、2 液混合型のアクリル樹脂を用いた。

2.2 荷重要領

試験要領を表-4 に、試験の実施状況を写真-1 に示す。荷重の支持条件は、図-2 に示すように横桁下の 4 隅で長さ 150mm の丸鋼を用いた 4 点単純支持とした。走行ラインは橋軸直角方向中央とし、直径 500mm、幅 300mm の鉄輪が試験体の中央から前後 1m を毎分 28 往復する。走行部には、120mm×300mm、厚さ 50mm の鋼製ブロックを 125mm の間隔で並べ、その上下をベニヤ板で挟み、その上に厚さ 9mm の鋼板を敷いた。さらに、走行ラインの両端部で鋼床版に穴をあけ、ボルトで鋼床版と前述の鋼板を固定した(写真-1)。走行ラインの ECC 表面は、不陸調整のために STEP2 以降においてエポキシ樹脂で被覆した。樹脂は透明度の高いものを使用し、実験の各段階で表面を観察できるようにした。

荷重の大きさは以下の理由で設定した。鋼床版のような薄板集成分材では、設計活荷重の対象となる大型トラックの後タンデム 2 輪が個別に作用することが、実橋の荷重試験においても確認されている⁵⁾。そこで、実自動車荷重を想定し、法定 1 軸重 50kN に衝撃を考慮して 1.4 を掛けた 70kN を基本とした。また、著者らの既往の実験²⁾と比較するため、基本荷重の 1.2 倍および 1.4 倍の 84kN および 98kN まで段階的に引き上げて、荷重レベルの影響を併せて検討した。輪荷重走行試験の各段階で静的荷重試験をスパン中央およびスパンの 1/4 点で実施した。

水張りの方法を図-4 に示す。段階的に水の影響を大きくした。STEP1 は ECC 上面が常に湿潤している状態、STEP2 および 3 は ECC 上面が既往の RC 床版における水張り輪荷重走行試験⁶⁾と同レベルで、さらに側面の山形鋼の内部に ECC の下面から 20mm まで水を滞水させた状態、STEP4 は対象区間が完全に水没した状態であり、



(引張降伏強度は、凸変曲点を結んだ線の最小値)

図-3 ECC の一軸直接引張試験の測定例

表-4 試験要領

実験段階	荷重 (kN)	回数 (回)	水張り方法	
			上面	側面
STEP1	70	20 万	1mm	—
STEP2	84	20 万	10mm	ECC 下面
STEP3	98	10 万		から 20mm
STEP4	98	10 万	10mm	全面

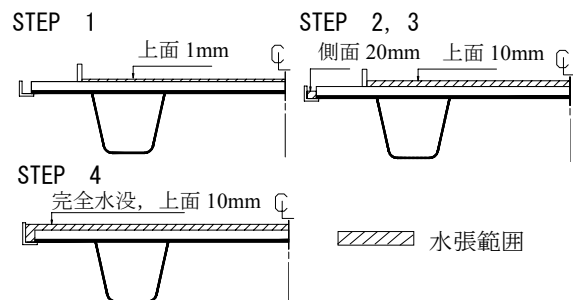


図-4 水張りの方法



写真-1 輪荷重走行試験実施状況

輪荷重荷重により、荷重版に拘束された ECC と鋼板内部の水に圧力が生じる状態を想定して設定した。

3. 実験結果

図-5および図-6に主桁支間中央での鋼床版たわみおよび鋼床版ひずみの経時変化を示す。橋軸直角方向の計測位置は、図中に併記した。図中の凡例は、それぞれ「載荷時」が荷重載荷時、「除荷時」が残留たわみおよび残留ひずみ、「活荷重」が「載荷時」から「除荷時」を引いた値である。図-7にSTEP1およびSTEP4終了後のECCのひび割れ状況を示す。

STEP1では、水張りを行う前の初期荷重によって、図-7に示す位置でひび割れが発生した。ひび割れ幅は0.04mm程度であり、ECCのひび割れ幅と繊維の架橋応力の関係⁹⁾から、ひび割れ部におけるECCは引張力を負担していたと思われる。その後、ECC表面に水を滞水させて試験を行ったが、ひび割れから水が浸透する様子が伺えた。試験中は、ECC内部に水が浸透することや、ECC表面からの揮発などによって水量が減少したため、適宜水を注水して、常にECC表面に1mm程度滞水する状態にした。STEP1終了時点では、ひび割れ幅を含めて、大きな変化は見られなかった。ただし、STEP1では走行ライン下面のECC表面の不陸によって試験機に過大な荷重がかかったため、STEP2に移行する際に、ECC表面を乾燥させた後、エポキシ樹脂にてECC表面の不陸調整を行った。

STEP2では、端部に20mm程度水を滞水させて、荷重を84kNとして20万回の載荷を行った。累計30万回前後で、鋼製ブロック下のベニヤが抜けるなどして荷重が偏載した可能性が高く、載荷点直下のひずみが一時的に安定しなかったが、たわみやひび割れに大きな変化は認められなかった。

STEP3では、STEP2と同じ水張りの状態で荷重を98kNまで引き上げた。たわみおよびひずみには大きな変化が認められなかったが、STEP3終了間際には、走行部付近からECCの成分が流出したと思われる白濁水が観察された。また、終了後に行った水抜きでは、走行部付近に乾燥しない箇所が確認された。STEP3までの最大ひ

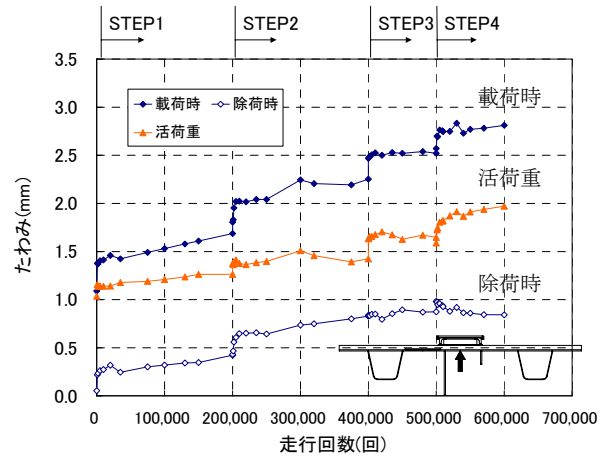


図-5 たわみの経時変化

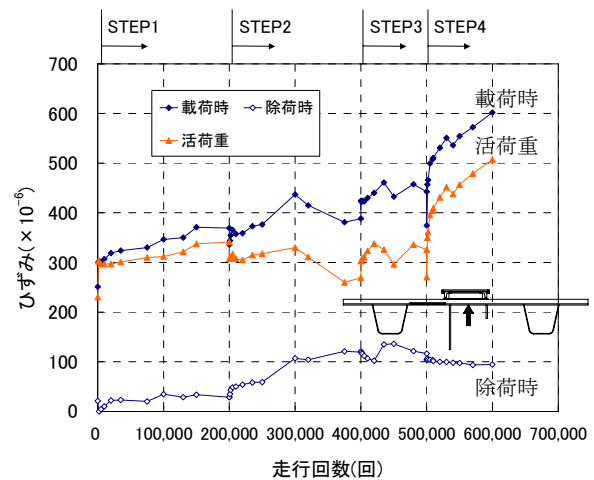


図-6 ひずみの経時変化



写真-2 水の噴出し状況

び割れ幅は、いずれも0.06mmだった。

STEP4では、STEP1~3までと異なり、鋼床版たわみおよび鋼床版ひずみのいずれも急速に増加した。開始直後に側面部から気泡が発生し(100回程度で消失)、9千回(累計50.9万回)にはN側走行部近傍から水の噴出しが観察された。また、5万回(累計55万回)からSTEP4終

了まで S 側でも水の噴出しが観測された。写真-2 に水の噴出し状況を示す。

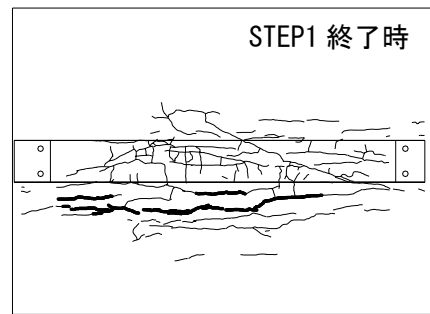
実験終了後に走行ライン下の樹脂を剥がして ECC 表面を観察したところ、既往の実験^{2,5)}とは大きく異なり、主桁支間中央付近の ECC が割れている状態が確認された(写真-3)。割れは、走行方向と平行に生じていた。また、割れている部分近傍の ECC の表面は、樹脂に付着した状態で 2~3mm の厚さで剥離していた。

4. 考察

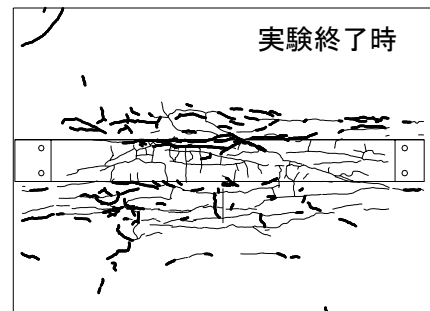
図-8 および図-9 に、STEP1 および STEP4 における主桁支間中央における橋軸直角方向のたわみ分布およびひずみ分布を示す。なお、縦軸は、載荷荷重の違いを正規化するため、計測値に最大載荷荷重 98kN を載荷荷重で除した値を乗じた値(換算活荷重たわみおよび換算活荷重ひずみと定義)として示した。表-5 にすべての STEP における換算活荷重たわみおよび換算活荷重ひずみの推移を示す。図-8 から、主桁近傍のひずみがゼロとなっており、鋼製ブロックの構造が橋軸直角方向の回転変形を拘束する影響と思われる。今後は、ブロックの構造を変更して試験を実施するなどして、その影響を検討する予定である。

表-5 から、STEP3 までは、たわみ、ひずみのいずれも概ね安定していることがわかる。また、図-7 から、既往の実験^{2,5)}と同様に、ECC 表面のひび割れは載荷荷重の上昇により増加するが、ひび割れ幅は最大で 0.06mm と既往の実験^{2,5)}と同レベルであり、前述の理由により ECC の引張性能が確保されていたと思われる。これらのことから、ECC 表面および下面に流水がある状態でも、本工法の疲労耐久性は、既往の RC 床版等と比較して、大きく低下しない可能性が高いと思われる。これは、ECC が粗骨材を使用せず、また、細骨材の粒径も小さいために、一般的なコンクリートで生じる摺磨きの影響が小さいことも一因であると思われる。

これに対し、STEP4 では、図-8、図-9 から



(注) 太線は初期載荷で生じたひび割れ



(注) 太線は STEP2 以降で生じたひび割れ

図-7 ひび割れ状況



写真-3 載荷版直下の最終状況

わかるように、載荷点直下のたわみおよび鋼床版のひずみが大きくなり、分布の勾配が急になっている。既往の実験において、鋼床版単体の場合は ECC 合成後と比較して勾配が急なことが確認されており⁵⁾、このことから、合成効果が小さくなり、鋼床版単体の挙動に近い状態になっていることが伺える。STEP3 までは、このようなことが確認されなかったことから、ECC 表面および側面を水で覆い、かつ支圧応力の大きい載荷ラインの ECC 上面を樹脂で被覆したため、輪荷重載荷の際に ECC と鋼板内部に浸透した水の圧力が上昇した可能性があると思われる。

5. まとめ

本実験より、ECC を上面増厚した本工法は、設計活荷重レベルにおいては、上面および下面に流水がある状態でも、大きな疲労耐久性の低下は生じないことが確認された。これに対し、鋼床版上面から ECC 上面までを完全に水浸させて、荷重の作用範囲近傍を密閉させた状態では、比較的早期に損傷を生じることが確認された。今後は、ECC と鋼板間の水に生じる圧力を模擬した実験等を行い、損傷のメカニズムを明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 構造委員会鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労，土木学会論文集，第410/I-12, pp.25-35, 1989.
- 2) 三田村浩，今野久志，松井繁之，須田久美子：高靱性セメント複合材料で上面増厚した鋼床版の輪荷重走行試験，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.60，pp.157-158，2005.
- 3) 坂田昇，須田久美子，閑田徹志，福田一郎，平石剛紀，巴史郎；高靱性繊維補強セメント複合材料の利用拡大，鹿島技術研究所年報，Vol.52，pp.233-238，2004.
- 4) 閑田徹志，永井覚，丸田誠；高靱性繊維補強セメント複合材料の施工性および耐久性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1859-1864，2003.
- 5) 福田一郎，坂田昇，須田久美子，三田村浩：高靱性セメント複合材料を用いた鋼床版上面増厚補強工法，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.5，pp.93-98，2005.
- 6) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.627-632，1987.
- 7) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.
- 8) コンクリート技術シリーズ 64 複数微細ひび

表-5 換算活荷重たわみ
および換算活荷重ひずみの変化

STEP	回数	たわみ		ひずみ	
		計測値 (mm)	比率	計測値 ($\times 10^{-6}$)	比率
1	1	1.45	1.00	322	1.00
	20万回	1.77	1.22	477	1.48
2	1	1.60	1.11	359	1.11
	20万回	1.66	1.15	314	0.97
3	1	1.63	1.13	303	0.94
	10万回	1.65	1.14	326	1.01
4	1	1.59	1.10	271	0.84
	10万回	1.97	1.36	508	1.58

(注) 比率はいずれも STEP1 の 1 回目に対するもの

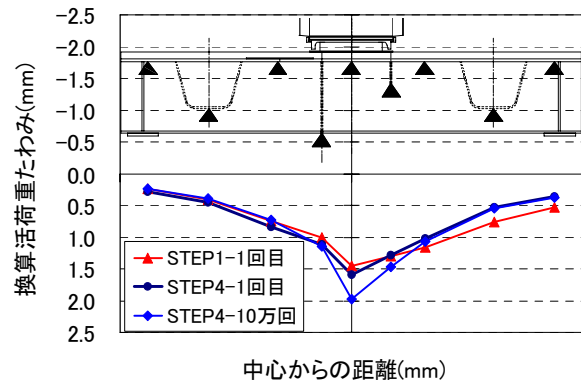


図-8 たわみ分布

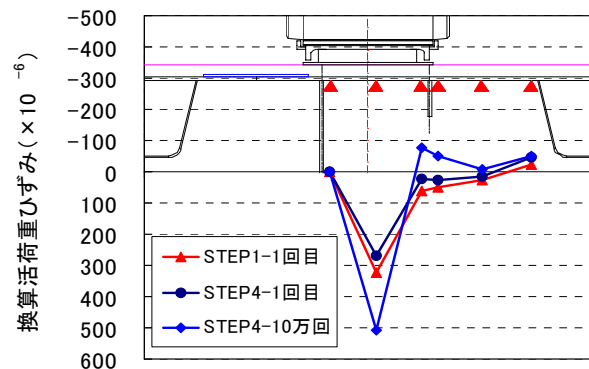


図-9 ひずみ分布

割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，土木学会，2005.7.

- 9) Li, V. C. et al: Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite, ACI materials Journal, Vol.98, No.6, pp.483-492, 2001